

# STATUS OF 11.424GHz X-BAND LINAC IN UTNS

Katsuhiro Dobashi\*, Mitsuru Uesaka, Haifeng Jin, Ming Jin

Nuclear Professional School, School of Engineering University of Tokyo  
22-2 Shirakata-shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki JAPAN 319-1188

## Abstract

Four X-band linacs are placed in Medinael Compact Linac Room, BLT building at UTNS. We are developing an X-band linac system for monochromatic X-rays source. The monochromatic X-ray is obtained by Compton scattering. Our system has an X-band (11.424 GHz) 3.5-cell thermionic cathode RF gun, traversing wave accelerating tube and a Q-switch Nd:YAG laser with a wavelength of 532 nm. We adopt a laser pulse circulation system.

## 東京大学 11.424GHz Xバンドライナックの現状

### 1. はじめに

東京大学大学院工学系研究科原子力専攻では、X-band Linac の医療産業応用を進めている。茨城県那珂郡東海村にある原子力専攻の核融合ブランケット棟医療用小型ライナック室では、本稿で紹介する 11.424GHz コンプトン散乱実験用 Linac<sup>[1,2]</sup>を始め、950keV, 3.95MeV, 6MeV の X-band Linac が設置されている。

本稿では、原子力専攻医療用小型ライナック室及び 11.424GHz X-band Linac の現状と展望を報告する。

### 2. 医療用小型ライナック室

前述の通り、東大原子力専攻核融合ブランケット棟医療用小型ライナック室には、現在 4 台の X-band Linac が設置されている (図 1)。

11.424GHz 30MeV X-band Linac は、地上階に電源類が設置され、本体ビームラインはグレーチングピット (地下) に設置されている。

地上階には、0.95MeV 9.3GHz 非破壊検査用 Linac 二号機、3.95MeV 9.3GHz 非破壊検査用 Linac、及び 6MeV 9.3GHz Linac が設置されている。0.95MeV 機は 250kW マグネトロンを RF 源とし、主にプラント配管減肉検査<sup>[3]</sup>の実験を行っている。また、3.95MeV 機は 1MW マグネトロンを RF 源とし、橋梁コンクリートの非破壊検査<sup>[4]</sup>に応用することを主な目的としている。6MeV 機も 1MW マグネトロンを RF 源とし、主に医療応用を目指している。

0.95MeV 機、3.95MeV 機とも、2011 年 2 月末に医療用小型ライナック室に搬入設置され、現在、定格出力を目指し運転調整中であり、X 線発生装置及び放射線発生装置設置申請準備中である。

図 2 に現在の医療用小型ライナック室の様子を示す。元々 11.424GHz 機の伝磁石電源ラックが設置されていた場所に、950KeV 機と 3.05MeV 機が陣取っている。

尚、6MeV 機は 2010 年 2 月 8 日に、11.424GHz 30MeV 機は 2009 年 3 月 9 日に許認可が降りている。

#### 2.1 0.95MeV, 3.95MeV Linac 設置のための環境整備

医療用小型ライナック室での実験は 2002 年度頃から始まった。当初は 11.424GHz 機のみでの設置であったが、

\*kdobashi@nuclear.jp

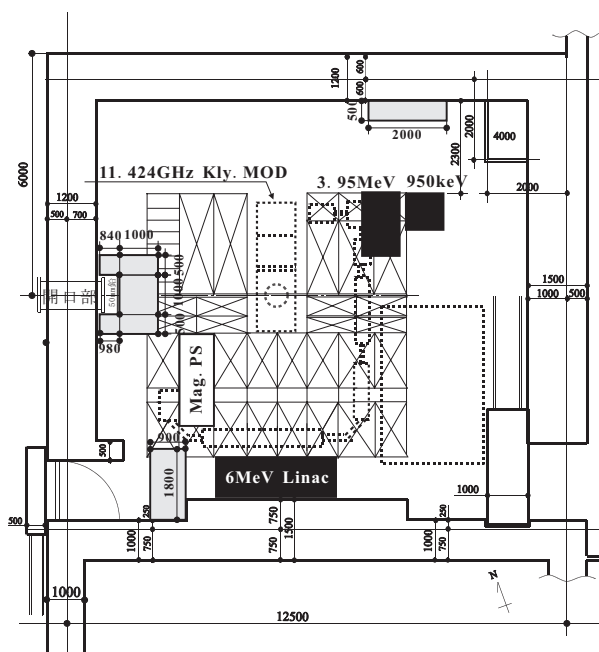


図 1: 医療用小型ライナック室全体図

6MeV 機や 0.95MeV 機等が新たに加わり手狭になっていた。0.95MeV 二号機と 3.95MeV 機を設置するスペースを確保するため、医療用小型ライナック室の環境整備を行った。

これまで 11.424GHz 機の電磁石電源等のラックが北側に並べて設置してあったが、これを西側へ移動し (図 1 の “Mag.PS”)、北側に 0.95MeV 機、3.95MeV 機を設置するためのスペースを確保した。ラック移動に伴いケーブル配線も行われた。ラック移動による配線のトラブルが心配されたが、ラック移動完了後、11.424GHz 機が無事運転出来ることが確認出来た。

#### 2.2 遮蔽の増強

0.95MeV 機、3.95MeV 機の設置に向け、医療用小型ライナック室の遮蔽の増強を行った。0.95MeV 機と 3.95MeV 機の X 線放射方向の壁に厚さ 500mm の固定

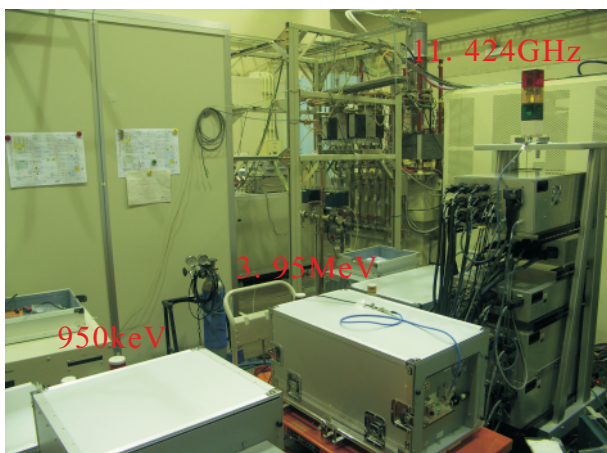


図 2: 医療用小型ライナック室の様子

遮蔽体を、6MeV 機の X 線放射方向には厚さ 900mm の可動式遮蔽体を設置した。

また、以前より懸念されていた配管用開口部にも厚さ 1000mm のコンクリート遮蔽体を設置した。

(追加された遮蔽体は、図 1 の灰色に塗られた部分)

### 3. 11.424GHz X-BAND LINAC

図 3 に 11.424GHz X-band Linac の概略図を示す。RF 源は KEK で ILC(JLC) 用に開発が続けられてきた 11.424GHz の 50MW クライストロンで、最大 50pps、パルス幅  $1\mu\text{sec}$  の RF の発生を目標に設計されている。ただし、現在のところ 10pps で運転している。発生した

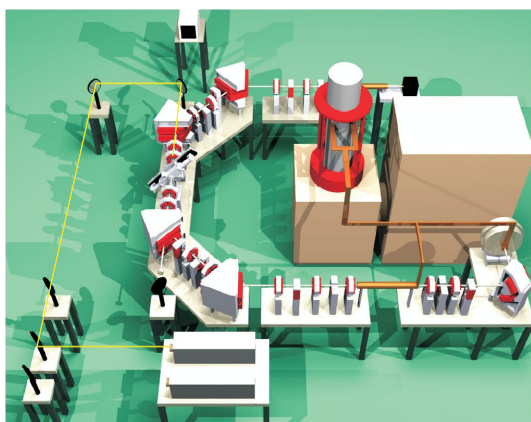


図 3: 11.424GHz X-band Linac の概略図

RF はグレーチングピットに設置しているビームラインに送られる、7dB HYBRID で分岐された RF は 3.5cell 熱カソード RF 電子銃と加速管にフィードされる。熱カソード RF 電子銃で発生したマルチバンチ電子ビームは、アルファ電磁石によりバンチングとエネルギー選別を受け、加速管で加速される。加速後の電子ビームはアクロマティックアークを通り衝突点で収束され、Q-switch Nd:YAG レーザー光と衝突する。

#### 3.1 これまでの成果

これまでに、熱カソード RF 電子銃からのビーム発生及び 30MeV までのビーム加速を確認している<sup>[5, 6]</sup>。

熱カソード RF 電子銃については、一号機で散見された不具合を解消するために、カソードロッド部分にチョーク構造を採用した二号機を製作し、ビームが安定して発生するようになった。<sup>[7, 8]</sup> これにより 30MeV までの加速及び衝突点までのビーム輸送が可能になった。

2010 年には、Q-switch Nd:YAG レーザー二倍波 (532nm) とビームとの衝突を試みた<sup>[6]</sup>。

#### 3.2 東日本大震災の影響

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災において茨城県東海村の東大原子力専攻も被災した。特にライナック棟と重照射棟の被害が大きかったようである<sup>[9]</sup>。

ブランケット棟の医療用小型ライナック室でも若干の被害を確認している。

**3.2.1 真空リーク** 震災直後に停電し、イオンポンプは全て停止した。

停電復旧後にチェックしたところ、イオンポンプが起動出来ないレベルまで真空度が悪化していた。後日リークチェックを行ったところ、ビームラインの 4 箇所まで真空リークを確認した。

一箇所はアルファ電磁石のチェンバーに接続されているイオンポンプとチェンバーをつなぐエルボーの NW25 フランジ部分からのリークであった (図 4)。二箇所目は、

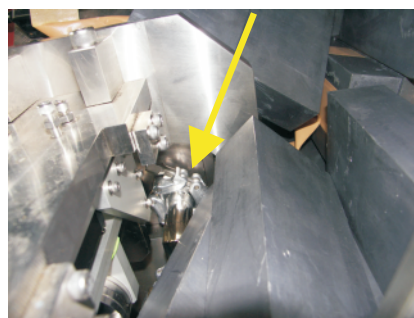


図 4: 真空リークを起こしたアルファ電磁石のチェンバー

進行波型加速管の出力 RF ポートの SLAC タイプフランジであった。この部分は、図 5 の様にダミーロードとイオンポンプが床にただ置かれているだけであったため、地震の揺れで揺さぶられた可能性も考えられる。三、四

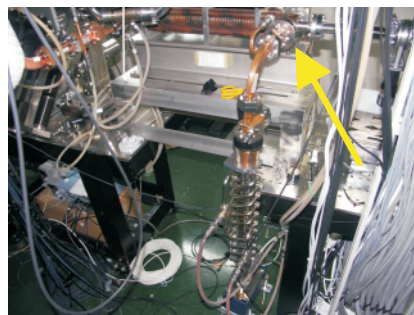


図 5: 真空リークを起こした SLAC 型 RF フランジ

箇所目は、衝突点手前の四極電磁石に挿入されているチェンバーの両端の NW25 フランジ部分 (図 6) であった。ビームラインやアルファ電磁石のチェンバーには、

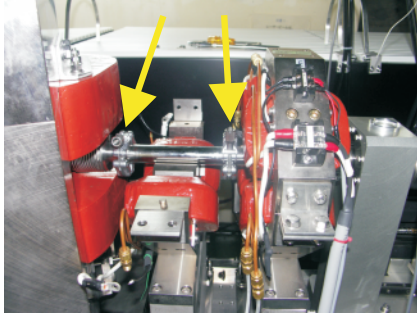


図 6: 真空リークを起こした NW25 フランジ

ICF フランジではなく NW25 フランジと EVAC<sup>[10]</sup> 製のチェーンクランプ及びアルミエッジシールを採用している。これは、省スペース性や作業性を考慮したためである。

実は、2010 年のビーム加速試験中にビームラインで作業を行った際にも、チェンバーに無理な力が加わったのか真空リークが発生し、ヒーター電流印加中の RF 電子銃熱カソードを大気に曝して駄目にしてしまうという事故も発生している。

個人的な感想であるが、エッジがしっかり噛む ICF フランジの信頼性は高いと見る。この手のチェーンクランプとアルミエッジシールを用いる場合は、トルク管理などをしっかり行う方が良い。

アルファ電磁石部分と RF フランジは作業の都合により増し締めで対処した。四極電磁石部分の NW25 フランジは、増し締めすら困難であったため、四極電磁石を半割りし、アルミエッジシールを交換した。対処後はイオンポンプも正常に起動し、運転可能なレベルの真空を保っている。

**3.2.2 遮蔽体の崩落** アルファ電磁石は、タングステンスリットが配置されているため X 線が発生する。この X 線を遮蔽するために鉛ブロックによる局所遮蔽を行っている。装置の調整の都合で鉛ブロックカバーを一時的に外して鉛ブロックの一部を撤去していたので、地震により鉛ブロックの一部が崩れた。

また、地下空調ダクト部分の局所遮蔽用のコンクリートブロックも崩落した (図 7)。しかし、新規に設置した



図 7: 倒壊した局所遮蔽用コンクリートブロック

コンクリート遮蔽は特に問題は無かった。これらの遮蔽体は、一個が 1t 以上のものもあるが、アンカーや金具でしっかり固定されている。

結局のところ、地震対策が十分でなかった部分で被害が発生したということである。

**3.2.3 ビームラインのアライメントとチャンバー変形** ビームラインコンポーネントの設置時には、設置精度 0.1mm を目標値としてアライメントを行っている。その後はアライメントのための測量機器が十分でないことや、空間上測量機器の設置や操作が困難な状況であるため、特にアライメントは行ってこなかった。

地震により、ビームラインコンポーネントのアライメントエラーの発生が懸念される。

実際、ビームラインのチェンバーの一部のベローズで変形が見られた。しかし、一度分解して変形した右側のベローズ (ベキングで変色している) のみを手で矯正すると、変形は元に戻った<sup>8</sup>。

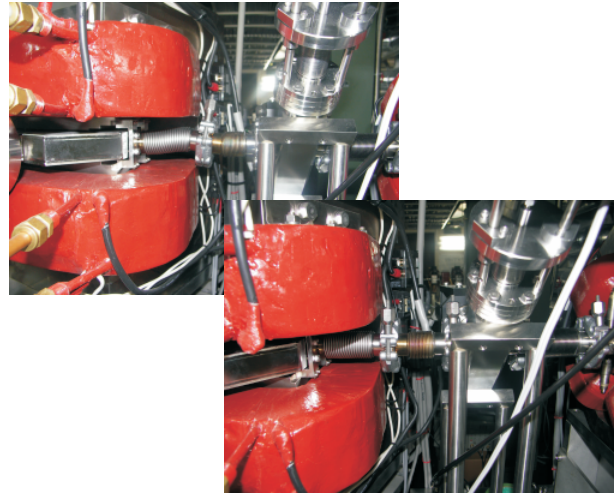


図 8: 変形したベローズ (左上) と正常になったベローズ (右下)

しかしながら、前述の通り、アライメントが正常であるかどうか確かめるのは現状では困難であり、ビームが実際に輸送出来るかどうかで確かめるのが、一番早い方法であると言える。

**3.2.4 クライストロン電源改修工事の遅れ** 当方のクライストロン電源のヒーター関連電源 (クライストロンカソードヒーター、サイラトロンカソードヒーター ×2、サイラトロンリザーバー ×2) は度々不調となり、運転に支障をきたしていた。ヒーター電源は交流のトライアック位相制御によるものであるが、これが異常な動作を起こすことがある<sup>[11]</sup>。

問題発覚後、しばらくはスライダックによる手動調整によりヒーターの点火をおこなっていた。

2010 年度にヒーター電源の改修が決定され、2011 年に入ってからヒーター電源を工場に送り返し、3 月末に設置工事及び動作確認を行う予定であったが、震災のため年度内に設置工事及び動作確認を行うことが出来なかった。

震災ということで当方の都合で工事は中断した。当方で設置することも可能ではあるが、ヒーター電源の改修工事であり、動作確認まで納入業者に責任をもって頂かねばなるまい。

予算執行の関係上、現在まで設置工事及び動作確認は中断されている。思わぬ形で震災の影響が出ている。

#### 4. 問題点と改善案

11.424GHz X-band Linac については熱カソード RF 電子銃の交換によりビームが安定に発生するようになってから、さらに問題が発覚している。

2010年に試みたレーザー電子ビーム衝突実験では、結局 X 線シグナルの確認に至らなかった<sup>[6]</sup>。

##### 4.1 アルファ電磁石

熱カソード RF 電子銃から発生した電子ビームをバンチング及びエネルギー選別するのがアルファ電磁石の役目である。が、しかし、重大な不具合が発覚している。

そもそも当初 RF 熱カソード RF 電子銃のビームエネルギーは 6MeV が想定されていた。しかし、実際には電子銃は 2-3MeV での設計に変更された。にも係わらず再検討されずに詳細設計されてしまった。

また、磁石のポール形状に問題があり、二次双曲線ではなく円形になっている。その上、製作後に測定された磁場分布は、磁場強度の高い部分で電流値に対し非線型に振る舞うことも分かっていた。後に行われた三次元磁場計算による検討<sup>[6]</sup>で、磁場漏れも発覚している。

また、後述の RF パワーの不安定性による熱カソード RF 電子銃のビームエネルギー変動が、アルファマグネットでのビーム軌道長の変動につながり、加速管入射位相のふらつきに結び付いているのではないかと指摘もある。

マンパワー不足も手伝って十分な検討も出来ず、プロジェクトの進行の関係上無理矢理インストールしたと言う印象は否めず、反省すべき点は非常に多い。

現在、アルファ電磁石の改修の検討を始めている。主には、

- アルファ電磁石の再製作
- アクロマティックアークへの入れ替え
- RF 電子銃出力ビームの加速管への直接入射

が挙げられている。

後述の通り X 線の発生が急がれるが、どの方法が有効か数値計算などで十分に検討する必要がある。

##### 4.2 RF 源

RF 出力の不安定性はビーム安定性に悪影響を及ぼすことは周知の通りであるが、当方も御多分に漏れずパルス毎の RF パワー不安定性によりビームエネルギーも不安定になり、衝突実験に支障をきたしている。特に、衝突実験用の X 線検出器のバックグラウンドシグナルが非常に不安定であり、ビーム軌道の不安定性によりバックグラウンド X 線の量も大きく変化しているものと思われる。

RF 出力パワーの不安定性の原因の大部分は、クライストロンモジュレーター電源の高電圧充電電源充電電圧のパルス毎のふらつきであると思われる。当初は  $\pm 0.1\%$

を達成する予定であったが、故障頻発により設計性能を満たせないような構成に変更された。これは、クライストロンや加速管等 RF コンポーネントのプロセッシングを優先させたためであり、現在の電圧ふらつきは、 $\pm 0.2 - 0.3\%$  であると見られている。

上記アルファ電磁石の問題を解決したとしても、RF パワーの不安定性をある程度除去しない限り、X 線バックグラウンドのふらつきを抑えるのは難しいのではないかと考えている。

何とか充電電源の充電電圧を安定化出来ないか思案中である。

#### 5. 応用実験構想

11.424GHz X-band Linac は、当初は IVCAG を目標に企画された<sup>[2]</sup>が、他の用途も検討中である。

例えば、東大上坂研では、 $1\mu\text{m}$  ビームサイズ PIXE(Particle Induced X-ray Emission) や SPring8 を用いて蛍光 X 線分析を行い白金系 DDS のがん細胞・組織への取り込み分析手法を確立しようとしているが、SPring8 のビームタイムの確保は難題である。11.424GHz X-band Linac で発生した X 線を自由に使えれば、実験の自由度も上がるものと期待される。

#### 6. まとめ

現在、東大原子力専攻の医療用小型ライナック室には 4 台の X-band Linac が設置されている。

コンプトン散乱 X 線生成実験用の 11.424GHz X-band Linac は、東日本大震災の影響を受けたが、ほぼ復旧したと言える。これまでの実験で様々な問題が発覚しており、これらの解決が急務である。

出来るだけ早く X 線発生実験を行い、実験に供したい。

#### 7. 謝辞

これまでの実験にあたり、高エネルギー加速器研究機構(KEK)の明本光生氏、肥後寿泰氏、福田茂樹氏、松本修二氏、並びに吉田光宏氏に助言等頂いている。また秋田高専の坂本文人氏には積極的に実験に参加頂いている。また、株式会社アキュセラの草野穰一氏、中村直樹氏、山本昌志氏にも助言頂いている。尚、9.3GHz 系の Linac は株式会社アキュセラ/AET の手によるものである。

特に、今年度から KEK に勤務している夏井拓也氏は、在学中本実験で多大な貢献をされた。厚く御礼申し上げたい。

#### 参考文献

- [1] M. Uesaka, et. al., "Monochromatic tunable Compton scattering x-ray source using x-band multi-bunch linac and yag laser circulation system". Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, Vol. 261, pp. 867-870, 2007.
- [2] K. DOBASHI, et al., "Design of compact monochromatic tunable hard x-ray source based on X-band linac". *Jpn. J. Appl. Phys.* 44 4A pp.1999-2005, 2005.
- [3] M Jin, "改良型 X バンド 950keV リニアック X 線源を用いた石油コンビナート配管の非破壊検査" MOPS138, Proceedings of the 8th Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2011.

- [4] H Jin, et. al., “3.95MeV Xバンドライナック X線源による橋梁コンクリート材の非破壊検査” MOPS136, Proceedings of the 8th Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2011.
- [5] 坂本文人、博士論文、東京大学、2007.
- [6] 夏井拓也、博士論文、東京大学、2011.
- [7] Y. Taniguchi, et al., Proc. of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 33rd Linear Accelerator Meeting in Japan, Hiroshima, 2008.
- [8] 谷口善広、修士論文、東京大学、2009.
- [9] “東京大学原子力専攻ライナック・レーザー研究施設現状報告 2011”, TUPS006, Proceedings of the 8th Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2011.
- [10] <http://www.evacvacuum.com/>
- [11] 森梓、修士論文、東京大学 2009.